

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03.25

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

по диссертации

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 28 мая 2026 г. № 6

О присуждении Тельновой Анне Юрьевне,
гражданке Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Исследование процессов переноса в компактном сферическом токамаке Глобус-М» по специальности 1.3.9. – «физика плазмы» принята к защите 19 февраля 2026 г. протокол № 3, диссертационным советом ФТИ 34.01.03.25 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от 15 июля 2025 г. № 02.01.02-153, приложение 3.

Соискатель Тельнова Анна Юрьевна, 30 августа 1992 года рождения, в 2015 году с отличием окончила магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ) по направлению подготовки 03.04.02 «физика». В 2019 году окончила аспирантуру в ФТИ им. А.Ф. Иоффе по направлению 03.06.01 - «Физика и астрономия». Кандидатские экзамены, в том числе по специальности 1.3.9. – «физика плазмы», успешно сданы соискателем в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2019 году. В настоящее время соискатель работает в должности научного сотрудника лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Минаев Владимир Борисович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. Кутеев Борис Васильевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» (НИЦ КИ), Курчатова комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий (ККТЭиПТ) предоставил положительный отзыв на диссертацию, содержащий 6 замечаний.

2. Крат Степан Андреевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических процессов в стенках термоядерных установок института лазерных и плазменных технологий (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»») предоставил положительный отзыв на диссертацию, содержащий 5 замечаний.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук» (ИЯФ СО РАН) предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 8 замечаний по тексту диссертации и 9 технических замечаний. Отзыв составил Поступаев Владимир Валерьевич, старший научный сотрудник лаб. 10 ИЯФ СО РАН, кандидат физико-математических наук. Отзыв подписали Бурдаков Александр Владимирович, советник директора ИЯФ СО РАН, доктор физико-математических наук и Багрянский Петр Андреевич, заместитель директора по научной работе ИЯФ СО РАН, доктор физико-математических наук. Отзыв утвердил и. о. директора ИЯФ СО РАН Логачев Павел Владимирович, академик РАН, доктор физико-математических наук.

В заключении отзыва ведущей организации сказано.

Диссертация А.Ю. Тельновой представляет собой законченное полноценное научное исследование, направленное на развитие физики удержания высокотемпературной плазмы в сферических токамаках. Полученные научные результаты являются достоверными, актуальными, новыми и важными для данного направления исследований.

Тема диссертации и содержание работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.9. – Физика плазмы.

Основные результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором либо при ее определяющем участии. В тексте корректно цитируются результаты работ других исследователей при их использовании.

Автореферат в полной мере и корректно отражает содержание диссертации.

Основные публикации по теме диссертации корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

Считаем, что диссертационная работа «Исследование процессов переноса в компактном сферическом токамаке Глобус-М» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 "Физика плазмы" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Тельнова Анна Юрьевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из них имеет ученую степень доктора наук, а второй – кандидата наук, они работают в различных организациях, не имеют ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что ИЯФ СО РАН является одним из ведущих институтов в России, занимающихся исследованиями в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза, а также мировым лидером по разработке и созданию инжекторов атомов для нагрева и диагностики высокотемпературной плазмы. Кроме того, в ИЯФ СО РАН действуют диссертационные советы по физико-математическим специальностям.

Основное содержание диссертации представлено в 6 публикациях, опубликованных в журналах, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук:

1. А.Ю. Тельнова, Минаев В.Б.; Щеголев П.Б. и др. Разработка системы напуска газа в ионный источник инжектора атомов токамака Глобус-М и оптимизация с ее помощью параметров атомного пучка // 2017, ЖТФ, 2017, том 87, вып. 7.
2. А.Ю. Тельнова, Курские Г.С., Мирошников И.В. и др. Исследование влияния тока плазмы на ионный теплоперенос в сферическом токамаке Глобус-М // ПЖТФ, 2018, Т. 44, В. 15. Р 100.
3. A. Yu. Telnova, Kurskiev G.S., Kiselev E.O. et al. Influence of the safety factor profile on the particle and heat transport in the Globus-M spherical tokamak // 2019, Plasma Sci. Technol., V. 21 P. 115101.
4. А.Ю. Тельнова, Курские Г.С., Бахарев Н.Н. и др. Перенос тепла и частиц в начальной фазе омических разрядов сферического токамака Глобус-М // 2019, ПЖТФ. Т. 45. В. 13. С. 17.

5. A. Yu. Telnova, Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V. et al. Ion heat transport study in the Globus-M spherical tokamak // 2020, Plasma Phys. Control. Fusion V. 62 P. 045011.
6. А.Ю. Тельнова, Минаев В.Б., Панасенков А.А. и др. Реновация ионно-оптической системы источника ИПМ-2 инжектора атомов сферического токамака Глобус-М2 // 2022, Журнал технической физики, 2022, том 92, вып. 4, С 540.

На автореферат поступило 4 отзыва.

1. Отзыв PhD, заведующего научной лабораторией перспективных методов исследования плазмы сферических токамаков СПбПУ, Гончарова Павла Романовича положительный, содержит 3 замечания:

- Среди современных обзорных работ, посвященных преимуществам сферических токамаков, в библиографии можно было бы упомянуть [M. Windridge 2019 Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20170438] и [D. Kingham, M. Gryaznevich 2024 Phys. Plasmas 31, 042507].
- На Рисунке 1 не вполне понятно конкретное расположение нейтронных детекторов. В подписи к Рисунку 2 лучше было бы вместе с наименованиями величин указать и их обозначения на осях.
- Объем автореферата ограничен, однако, для самостоятельности, лучше было бы пояснить и именовать все величины, входящие в систему уравнений (1), (2), коль скоро эти уравнения в автореферате приведены. После уравнения (2) следующая формула имеет номер (2.3). Сосуществуют английские обозначения единиц измерения на рисунках и русские в Таблице 1 и в тексте автореферата.

2. Отзыв кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории методов нагрева и генерации тока плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе Корнева Владимира Александровича положительный, содержит 1 замечание:

- На стр. 19 написано: «Тем не менее, время удержания энергии в разряде соответствует времени удержания энергии, рассчитанному по скейлингу $IPV98(y,2)$ (см. рисунок 4)». В действительности данная зависимость представлена на рисунке 5.

3. Отзыв кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Акционерного общества «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА») Минеева Анатолия Борисовича положительный, содержит 3 замечания:

- Стр. 3, написано:

«В силу своих небольших размеров, сферический токамак получается экономически более выгодным, по сравнению с классическим токамаком ($A > 3$)».

Сферические токамаки (как и классические) ещё не дошли до стадии, когда уже можно сравнивать экономические показатели. По-видимому, речь идёт пока о большей компактности сферических токамаков.

- Стр. 3, написано:

«На пути к коммерческому использованию как гибридного, так и термоядерного реактора необходимо решить множество физических и инженерных задач».

Вместо этого, наверное, лучше написать:

как гибридного, так и чисто термоядерного реактора поскольку гибридный – это тоже термоядерный реактор, но с ядерным усилением.

- На стр. 17 написано:

«Оба эти токамака используют дрейфовое приближение, которое плохо применимо к сферическим токамакам».

В таком общем виде вывод о том, что дрейфовое приближение не годится для сферических токамаков, по крайней мере, нуждается в пояснении. Возможно это и так, для небольшого уровня тороидального поля B_t . Но с ростом B_t дрейфовое приближение должно работать лучше.

4. Отзыв кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника отделения экспериментальной физики токамаков Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» Неудачина Сергея Владимировича положительный, содержит 4 замечания:

- При обсуждении формирования ВТБ на плотности в одном, а температуры электронов в другом Омическом режиме, Автор сравнивает водородный и дейтериевый разряды, а изменение втрое величины χ_e / De при $r/a=0.6-0.7$ (заведомо вне ВТБ и возможной зоны обратного шира) даже не обсуждается.
- Рис.5 вводит читателя в заблуждение, ведь даже из деталей диссертации неочевиден выбор для анализа переноса сильно нестационарной части данного разряда, в которой даже за короткое интервал со 151 мс по 158 мс сигнал мягкого рентгена и радиационные потери сильно возрастают, а на рисунке расчетная величина tE утраивается каким-то образом, (по-видимому, в основном, из-за роста плотности), что не объяснено в тексте.
- При анализе переноса в ряде режимов с улучшенным удержанием при инжекции горячих нейтралов в токамаках JET, TFTR и JT-60U выяснилось, что цифра 2.5 в члене $2.5\dot{\Gamma}_n Te, i$ должна быть заменена

на 1.5. Один-два подобных расчета для Глобус-М были бы очень полезны.

- При оформлении автореферата соискатель допустил ряд опечаток, например,
 - стр. 13, 3-я строка после Параграф 1.4;
 - стр. 19, строки 9 и 14 сверху;
 - стр. 32, ссылка 38.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по диссертации «Исследование процессов переноса в компактном сферическом токамаке Глобус-М» были получены следующие основные результаты:

1) Выполнена модернизация комплекса нейтральной инжекции, благодаря которой стало возможно поддерживать постоянные параметры нейтрального пучка на протяжении всего импульса инжекции, что обеспечило квазистационарные условия проведения эксперимента и упростило интерпретацию его результатов.

2) На базе кода ASTRA разработана транспортная модель, предназначенная для исследования процессов переноса тепла и частиц в разрядах плазмы сферического токамака Глобус-М. Для определения поглощенной мощности пучка в режимах с нейтральной инжекцией в модель были включены результаты расчетов с использованием блока NBI и кода NUBEAM, а также трехмерного кода, моделирующего траектории движения быстрых частиц.

3) С помощью разработанной модели исследованы как разряды с омическим нагревом плазмы, так и разряды с нейтральной инжекцией. Моделирование показало наличие двух сценариев омического нагрева плазмы с формированием ВТБ: либо на профиле электронной плотности, либо на профиле электронной температуры. В разрядах с нейтральной инжекцией экспериментально показана возможность возникновения ВТБ на профиле электронной плотности или температуры в отсутствие пилообразных колебаний, что подтверждается проведенным транспортным анализом.

4) Исследования ВТБ в разрядах с нейтральной инжекцией на стадии роста тока показали, что создание немонотонного профиля запаса устойчивости позволяет сформировать область с пониженным переносом частиц, что приводит к пикированию концентрации электронов. При этом значительное снижение переноса в центральной области плазмы приводит к накоплению примесей. Тем не менее, время удержания энергии в разряде совпадает с временем, рассчитанным по скейлингу ИТЭР IPB98(y,2).

5) Проведено экспериментальное исследование влияния тока плазмы и столкновительности на ионный теплоперенос. По результатам экспериментов было выполнено моделирование, которое показало, что поведение

ионов в сферическом токамаке Глобус-М описывается неоклассической теорией в исследованных экспериментальных условиях.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные в ходе её выполнения результаты могут быть использованы для проведения экспериментов с дополнительным нагревом плазмы с помощью нейтральной инжекции в квазистационарном режиме. Исследования, проведенные на токамаке Глобус-М, подтвердили неоклассический характер переноса энергии ионами, что является аргументом в пользу использования сферических токамаков как в качестве источника нейтронов, так и самостоятельного термоядерного реактора. Полученный омический режим со сниженным переносом тепла электронами перспективен для создания плазмы-мишени для источника нейтронов. Создана расчетная модель плазмы сферического токамака Глобус-М, позволяющая оценивать ожидаемые физические параметры плазмы по инженерным характеристикам разряда. Модель может быть применима к расчетам для токамака Глобус-М2, и адаптирована к проектируемому сферическому токамаку Глобус-3.

Достоверность полученных результатов обеспечена хорошим соответствием экспериментальных данных, полученных при многократном повторении измерений, результатам моделирования, выполненного с помощью нескольких компьютерных кодов. Описываемые в работе результаты были опубликованы в 6 статьях в реферируемых журналах, а также обсуждались на российских и международных конференциях, на семинарах и совещаниях лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также представлялись в четырех докладах на конференциях:

1. А.Ю. Тельнова и др., Влияние увеличения тороидального магнитного поля на нагрев и удержание плазмы в разрядах токамака Глобус-М с нейтральной инжекцией // 44я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 13 - 17 февраля 2017 года.
2. А.Ю. Тельнова и др., Влияние величины магнитного поля на удержание энергии и частиц в сферическом токамаке Глобус-М // Международная молодежная конференция Физика, СПб, 24-27 октября, 2017 г.
3. A.Yu. Telnova et al, Influence of the reversed safety factor profile on the transport in the Globus-M spherical // 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2-6 July 2018, Prague, Czech.
4. А.Ю. Тельнова и др., Особенности теплопереноса в ионном канале на сферическом токамаке // 45я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 2 - 6 апреля 2018 года.

Актуальность полученных результатов обоснована тем, что сферические токамаки рассматриваются в настоящее время, как тип плазменных установок, предназначенных для осуществления управляемого термоядерного синтеза (УТС). Кроме того, компактные сферические токамаки являются наиболее перспективными для создания на их основе так называемого термоядерного источника нейтронов (ТИН). Ожидается, что ТИН будет востребован как в энергетике, так и во многих других направлениях науки и промышленности.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Применение программируемой регулировки подачи рабочего газа в ионный источник инжектора атомов обеспечивает оптимизацию фокусировки атомного пучка и позволяет реализовать на токамаке Глобус-М стабильную работу инжектора в течение увеличенного в $\sim 1,7$ раза (50 мс) импульса инжекции, что значительно превышает ожидаемое время удержания энергии (до 7 мс).

2. Применение метода раннего включения нейтральной инжекции на токамаке Глобус-М (на стадии подъема тока плазмы) позволяет получить режим с длительной фазой без пилообразных колебаний при тороидальном магнитном поле 0,5 Тл и сформировать в плазме пикированный профиль концентрации электронов. Моделирование режима демонстрирует существование профиля запаса устойчивости со значением $q > 1$ по всему сечению плазменного шнура, что позволяет сформировать область с пониженным переносом частиц в зоне $r/a < 0,6$ при значении времени удержания энергии, соответствующему скейлингу IPB98(y,2).

3. Снижение ионной столкновительности с 0,12 до 0,03 в сферическом токамаке Глобус-М в режимах с нейтральной инжекцией высокоэнергичного пучка атомов позволяет уменьшить величину ионной температуропроводности плазмы в области середины малого радиуса с $4 \text{ м}^2/\text{с}$ до $1,2 \text{ м}^2/\text{с}$, что соответствует неоклассической теории и позволяет исключить влияние турбулентного механизма на ионный теплоперенос.

Как уже отмечалось выше, все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Лично автором была разработана, реализована и внедрена новая система напуска рабочего газа в газоразрядную камеру инжектора, обеспечившая стабильность параметров генерируемого атомарного пучка в увеличенном по длительности до 50 мс импульсе инжекции. Также лично автором и при его непосредственном участии была проведена реновация ионно-оптической системы источника ионов ИПМ-2 и его вывод на рабочие параметры для осуществления инжекции на сферическом токамаке Глобус-М2. Лично автором была создана расчетная модель

плазмы сферического токамака Глобус-М на основе кода ASTRA и блока NBI, в связке с кодом NUBEAM, позволившая получить основные результаты данной работы и оценивать ожидаемые физические параметры плазмы по инженерным характеристикам разряда. Все эксперименты, описанные в работе, проводились при личном участии автора. Лично автором было проведено моделирование, показавшее, что в компактном сферическом токамаке при тороидальном магнитном поле 0,5 Тл в разрядах с инжекцией на стадии роста тока в центре плазменного шнура формируется область с коэффициентом диффузии частиц, близким к неоклассическому. Также лично автором на основе проведенного моделирования было показано, что в исследуемых режимах ионный теплоперенос близок к неоклассическому как в режимах с высокой, так и с низкой (до 0,03) нормализованной частотой столкновений.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы», участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 17, против – 0, мнение выявить не удалось – 0.

На заседании 28 мая 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Тельновой А.Ю. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. – «физика плазмы».

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

О.С. Васютинский

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

Г.С. Курскиев

28 мая 2026 г.